

Jori Isohanni

# Hybridimönkijän voimansiirron perusrakenteen suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

29.1.2016

Tekijä(t) Otsikko	Jori Isohanni Hybridimönkijän voimansiirron perusrakenteen suunnittelu
Sivumäärä Aika	28 sivua 29.1.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Osaamisaluepäällikkö, tekn. lis., Pekka Hautala
<p>Tämän työn tavoitteena on luoda perusrakenne hybridimönkijän portaattomalle voimansiirrolle. Ennen työn aloitusta oli tehty jo yksi prototyyppi konseptin toiminnan varmistamiseksi, ja siitä saatiin arvokasta tietoa jatkoa varten. Tässä työssä keskitytään projektin mekaanisiin ratkaisuihin.</p> <p>Vaihteistossa käytettiin aiemmin sovellettua planeettavaihdetta toteuttamaan täysin portaaton vaihteisto, jota sekä polttomoottori että sähkömoottori käyttävät. Työn aikana pohdittiin aiemman prototyypin ongelmia ja pyrittiin ratkaisemaan ne.</p> <p>Lopputuloksena saatiin yksinkertaisempi rakenne, jossa edellisen prototyypin oleelliset ongelmat on ratkaistu.</p>	
Avainsanat	Mönkijä, hybridi, portaaton, voimansiirto

Author(s) Title	Jori Isohanni Basic Layout Design for Hybrid ATV Transmission
Number of Pages Date	28 pages 29 January 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design
Instructor(s)	Pekka Hautala, Tech.Lic., Head of Automotive and Mechanical Engineering Department
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to create a basic layout for a Constantly Variable Transmission of a Hybrid-Powered All-Terrain Vehicle. Before this thesis, one prototype of the transmission had already been developed to ensure the proper functioning of the concept. This prototype has given valuable information for further development.</p> <p>The transmission utilizes a previously adapted planetary gear to develop the Constantly Variable Transmission, powered by an internal combustion engine and an electric motor. This thesis focuses on mechanical design solutions.</p> <p>During the thesis work problems and challenges of the previous prototype were examined and suggestions were made to solve them.</p> <p>As an overall result, a more simple layout was created. Furthermore, solutions were suggested to resolve the essential problems of the previous prototype.</p>	
Keywords	Hybrid, ATV, CVT, Transmisson

## Sisällys

1	Johdanto	1
2	Taustaa	2
2.1	Portaaton voimansiirto	2
2.1.1	Hihnavariaattori	2
2.1.2	Hydromekaaninen vaihteisto	4
2.1.3	Hondamatic HMT	4
2.2	Metropolian hydraulimönkijä	5
2.3	Ensimmäinen hybridiprototyyppi	6
2.3.1	Prototyypin perusrakenne	7
2.3.2	Tulokset	9
3	Voimansiirron uudelleensuunnittelu	9
3.1	Konsepti	10
3.2	Vaihteen toiminta uudessa kokoonpanossa	10
3.2.1	Sähköajo	12
3.2.2	Joutokäynti ja paikallaan lataus	13
3.2.3	Hybridiajo	13
3.2.4	Mönkijän välityssuhteet	16
3.2.5	Johtopäätökset	16
4	Toteutus	17
4.1	Komponentit	17
4.1.1	Polttomoottori	17
4.1.2	Sähkömoottorit	18
4.1.3	Akusto	19
4.2	Ratkaisumallit	19
4.2.1	Rotax ja vanha vaihteisto	19
4.2.2	Rotax ilman vanhaa vaihteistoa	23
4.2.3	ACE602 ja suora voimansiirto	24
4.3	Ratkaisu	27
5	Yhteenveto	27



## 1 Johdanto

Fossiilisten polttoaineiden käyttöä pyritään enenevissä määrin globaalisti rajoittamaan kasvihuoneilmiön vaikutusten vähentämiseksi. Tästä syystä markkinoilla on koko ajan kasvava valikoima sekä täysin sähköisiä autoja että sähköhybridiautoja. Hybridillä saadaan yhdistettyä perinteisen polttomoottorin toimintasäde ja sähköauton päästötön sähköajo sekä jarrutusenergian takaisinkierrätys. Kahden erilaisen voimanlähteen eräs haaste samassa ajoneuvossa on toiminnallisesti riittävän joustava vaihteisto. Toisaalta sähkökäyttö avaa uusia mahdollisuuksia käyttömukavuuden ja taloudellisuuden parantamiseen.

Lukuun ottamatta pienitehoisia sähköisiä ruohonleikkureita, moottori- ja raivaussahoja sekä perämoottoreita pienkoneissa ja kevyissä kulkuneuvoissa luotetaan vielä täysin perinteiseen polttomoottoriin. Moottorikelkoissa ja mönkijöissä sähkömoottorin tuottama suuri vääntömomentti laajalla kierroslukualueella heti liikkeellelähdestä alkaen sopii erittäin hyvin, mutta tällä hetkellä puhtaan sähkökäytön toimintasäde ja toimintavarmuus vaativissa olosuhteissa eivät ole riittäviä. Sähkökäytön puolesta puhuu myös melu, sillä joillain alueilla melusta on merkittävää haittaa ja esimerkiksi suojeltujen vesistöjen alueilla polttomoottorilla varustettujen kulkuneuvojen käyttö saattaa olla jopa kielletty. Hybridiratkaisulla saadaan molempien voimanlähteiden hyvät puolet, mukaan lukien hiljainen ja paikallisesti päästötön käyttö rajoitetun matkan.

Tämän työn tavoitteena on luoda perusrakenne hybridimönkijän portaattomalle voimansiirrolle. Ennen työn aloitusta oli tehty jo yksi prototyyppi konseptin toiminnan varmistamiseksi, ja siitä saatiin arvokasta tietoa jatkoa varten. Tässä työssä keskitytään projektin mekaanisiin ratkaisuihin.

Hybridimönkijän on tilannut Metropolia Ammattikorkeakoululta BRP Finland Oy.

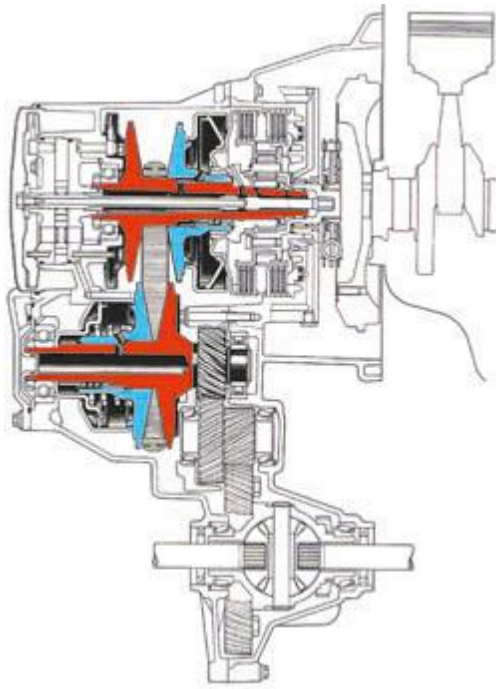
## 2 Taustaa

### 2.1 Portaaton voimansiirto

Portaattomalla voimansiirrolla, portaattomalla vaihteistolla eli CVT:llä (Continuously Variable Transmission) tarkoitetaan vaihteistoa, jossa välityssuhdetta voidaan säätää annetun suurimman ja pienimmän välityssuhteen välillä rajattomasti katkaisematta ajavaa voimaa. Tämän etuna on vapaus valita ajotilanteen mukaan pyörintänopeus, jolla vaihteistoa pyörittävää moottoria ajetaan, sekä tästä johtuva käyttömukavuus. Ajoneuvojen vaihteistoksi se sopii mainiosti, sillä parhaimmillaan sen toiminta käyttäjälle vastaa automaattivaihteistoa ja oikeanlaisella ohjauksella polttomoottori käy aina optimaalisella käyntinopeudella säästäten polttoainetta.

#### 2.1.1 Hihnavariaattori

Ajoneuvokäytössä parhaiten menestynyt CVT-vaihteisto koostuu kartiohihnasta ja variaattorista. Pienissä sovelluksissa, esimerkiksi skoottereissa, kartiohihna on tehty kumiseoksesta ja toiminta perustuu hihnan kykyyn siirtää voimaa vetojännityksen kautta. Suurempia voimia siirrettäessä tällaisen hihnan käyttö ei enää kuitenkaan ole mitoituksen puolesta järkevää. Silloin käytetään teräslamellihihnaa, jonka toiminta perustuu lamellien kykyyn työntää toisiaan sisääntuloakselin jälkeen. Voima siis siirtyy teräslamellien puristumisen seurauksena, ei vetämällä kuten kumihihnan tapauksessa.



Kuva 1. Henkilöauton CVT-vaihteisto [1, s.123]

Välityssuhteen muutos toteutetaan muuttamalla kartiopyörien välistä etäisyyttä sekä sisääntuloakselilla että ulostuloakselilla. Kartiopyörien liikuttamiseen vaadittava voima saadaan vaihteiston sisäiseltä hydraulipumpulta. Tyypillisesti ajoneuvokäytössä tällaisen vaihteiston välityssuhde liikkuu välillä 2,50...0,50.

Kun kartiopyörät ovat samalla akselilla lähellä toisiaan, hihna pakotetaan kulkemaan akselin ympäri suurella säteellä. Vastaavasti kartiopyörien ollessa kaukana toisistaan hihna kulkee lähempänä akselia. Haluttu välityssuhde lasketaan vaihteiston ohjausyksikössä, joka säättää molempien akseleiden hihnapyörien asemia. Kun käytävällä akselilla hihna kulkee suurella säteellä ja käytettävällä pienellä, on välityssuhde pieni ja päinvastoin.

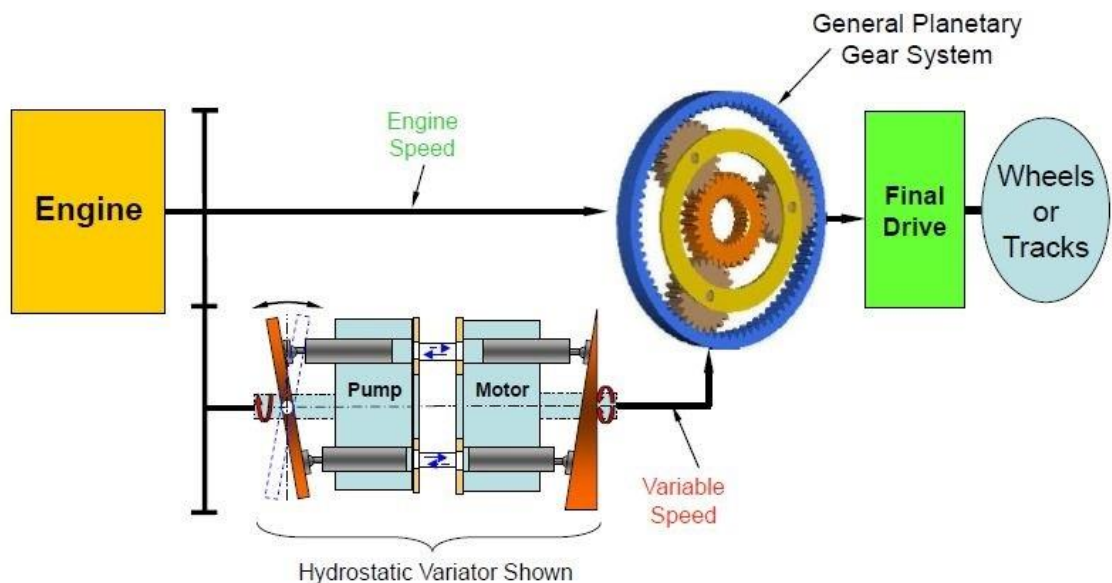
Tällaisella vaihteistolla on myös huono puoli, sillä välityssuhde ei voi olla äärettömän suuri. Toisin sanoen polttomoottorin ja vaihteiston väliin tarvitaan kytkin sellaisiin tilanteisiin, joissa ajoneuvo seisoo paikallaan ja moottori käy. Vastaavasti moottorin käynnistäminen ilman kytkintä olisi käytännössä mahdotonta. Kytkiminä käytetään perinteisesti sähköisesti ohjattua märkää lamellikytkintä tai uudemmissa vaihteistoissa sähkömagneettista pulverikytkintä. Pulverikytkimiin on siirrytty märän lamellikytkimen ajon aikaisen luiston poistamiseksi. [1, s.123.]



### 2.1.2 Hydromekaaninen vaihteisto

Traktori- ja maansiirtokonevalmistajat ovat vuosia kehittäneet tuotteisiinsa hydromekaanisia portaattomia vaihteistoja. Käytännössä toimintaperiaate on pitkälti samanlainen eri valmistajien vaihteistoissa. Polttomoottorin akseli pyörittää osaa planeettavaihteesta, ja osaa vaihteesta pyörittää yleensä vinolevy-tyyppisellä mäntäpumppu- ja moottoriparilla toteutettu portaaton hydrostaattinen variaattori. Variaattori saa käyttövoimansa polttomoottorilta. [2.]

Kuvassa 2 nähdään yksinkertaistettu hydromekaanisen vaihteiston toimintaperiaate. Moottorin ja planeettapyörästä on yleensä oma vaihteisto kytkimineen.



Kuva 2. Hydromekaaninen vaihteisto [2].

### 2.1.3 Hondamatic HMT

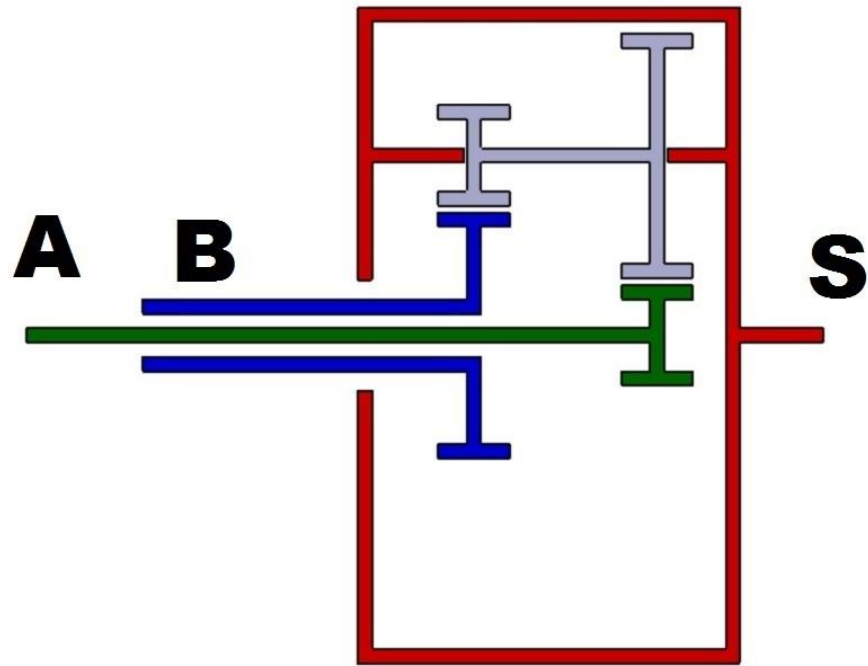
Yksi mielenkiintoinen pienkoneiden vaihteistoratkaisu on Hondan kehittämä Hondamatic HMT (Hydro-Mechanical Transmission). Honda käyttää sitä kalliimmissa mönkijöissään. Vaihteistossa polttomoottorin momentti ja pyörintänopeus tuodaan hydraulisen vinolevytyyppisen mäntäpumpun sylinteriryhmään. Pumpun vinolevyllä on kiinteä kulma.

Pumppu luo toimiessaan hydraulisen paineen samantyyppiselle hydraulimoottorille. Tällä kerralla moottorin vinolevyn kulmaa säädetään. Kun vinolevy on maksimikulmassaan, pumpun tuottama öljy vain liikkuu edestakaisin eikä vaihteiston läpi kulje voimaa. Kun vinolevyn kulmaa pienennetään kohti vaakatasoa, hydraulipumpun tuotto on suurempi kuin moottorin kulutus. Silloin moottorin sylinteriryhmä kiertyy. Kiertymä on suhteessa vinolevyn asemaan. Kun vinolevy on nollakulmassa, moottorin männät eivät liiku ollenkaan ja vaihde on mekaanisesti lukittu suoraksi. [3.]

## 2.2 Metropolian hydraulimönkijä

Vuonna 2007 valmistui Pauli Salmisen diplomityö ”Portaattoman voimansiirtojärjestelmän kehittäminen” [3]. Työssään Salminen keskittyy hydraulimönkijäprojektiin, jonka aikana kehitettiin ja rakennettiin osana voimansiirtoa Neptunus-nimen saanut planeettavaihte. Tällä vaihteella Salminen toteutti prototyypin hydraulisella voimalla säätyvästä voimansiirrosta, joka eroaa oleellisesti edellä käsitellyistä ratkaisuista. Vaihteen toimintaperiaatteen on keksinyt Seppo Paalasmaa.

Neptunus-vaihte koostuu kahdesta aurinkopyörästä ja planeettapyöräpareista. Akseli A kulkee akselin B sisällä ja akseli S on yhteydessä vaihteen runkoon, joka toimii samalla planeettapyörrien kannattimena. Rungossa ei ole sisäpuolista hammastusta. Kyseessä on differentiaalivaihte.



Kuva 3. Neptunuksen sisäinen kytkentä.

Salmisen sovelluksessa vaihteen A-akselia pyörittää polttomoottori. B-akseli on voiman ulosottoa varten. S-akselille on asennettu hydraulimoottori, ja se toimii säätöakselina. Lyhyesti S-akselin pyörintänopeudesta riippuu akseleiden A ja B eli polttomoottorin ja ulostuloakselin välinen välityssuhde. Mekaanisen kytkimen tarve poistuu täysin, koska polttomoottori voi pyöriä ajoneuvon ollessa pysähtyneenä. Ehtona tälle sen pyörintänopeus kompensoidaan säätöakselilla niin, että ulostuloakselin pyörintänopeus on nolla. Sopivan laajalla säätöakselin kierroslukualueella myös peruutusvaihte on mahdollinen.

### 2.3 Ensimmäinen hybridiprototyyppi

Tässä työssä käsiteltävän voimansiirron kehitys alkoi vuonna 2012 Metropolia Ammattikorkeakoulun auto- ja kuljetustekniikan tuotetekniikan ja autosähkötekniikan suuntautumisvaihtoehtojen kolmannen vuosikurssin luokkien yhteisenä innovaatioprojektina. Tätä varten saatiin tilaajalta Can-Am Outlander Max 500 -mönkijä. Prototyypissä käytettiin lyijyakuista voimansa saavia harjattomia tasavirtamoottoreita. Prototyypin toiminnasta valmistui Mikael Braggen insinöörityö [4] ja sen avulla voimansiirron toiminnasta saatiin arvokasta tietoa.

### 2.3.1 Prototyypin perusrakenne

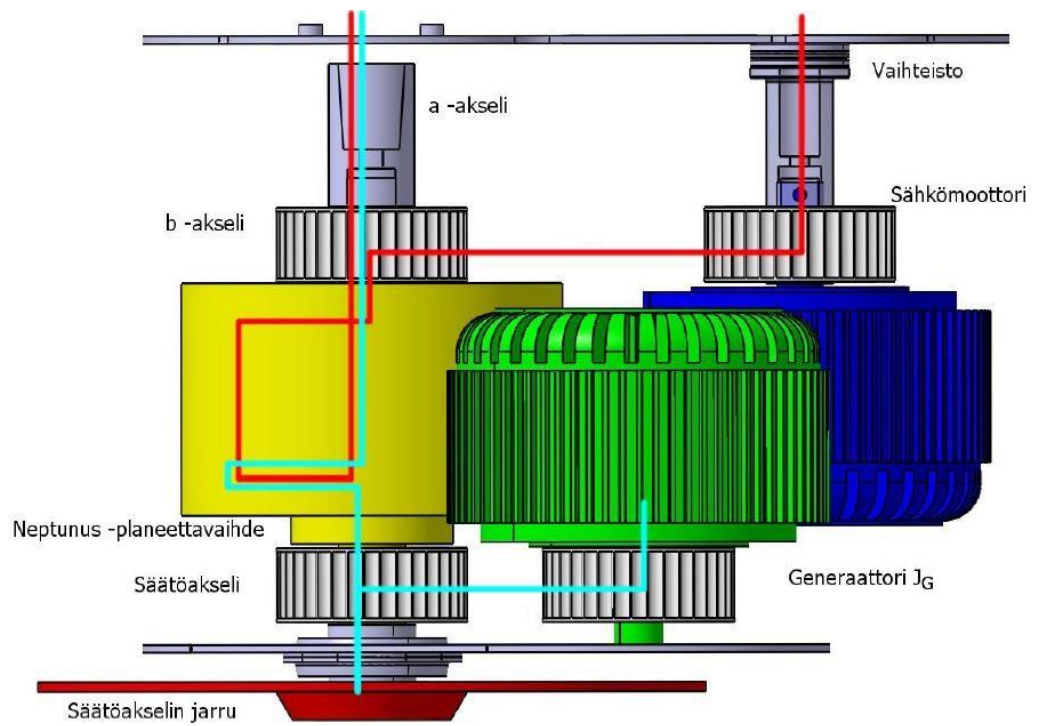
Innovaatioprojektia varten saadussa mönkijässä on tehtaalta tullessaan Rotax V2 -moottori. Moottori on sijoitettu siten, että sylinterit ovat mönkijän runkoon nähden pitkitäin ja kampiakselilta voima saadaan ulos ajoneuvon vasemmalta puolelta. Välittömästi moottorin takana on kiinteä vaihteisto, josta voidaan valita alennusvaihde, peruutusvaihde ja neliveto. Nelivedon voimansiirtoakseli etuakseliston perävälitykselle kulkee moottorin öljypohjan läpi. Moottoria ja vaihteistoa yhdistää niiden vasemmalle puolelle sijoitettu hihnavariaattori.

Prototyypin voimansiirron perusrakenne toisti Salmisen diplomityössä käytettyä rakennetta sillä erolla, että Neptunuksen S-akselilla alun perin olevan hydraulimoottorin tilalla on sähkömoottori. Lisäksi S-akselilla on jarru, jonka tarkoituksena on lukita välityssuhde pelkkää polttomoottoriajoa varten. Rakenteessa on myös toinen sähkömoottori Neptunuksen rinnalla akselilla B ja tällä rakenteella sallitaan puhdas sähköajo. Korvaamalla Salmisen esittämä hydraulinen kokoonpano sähköisellä voimalinjalla saadaan koko rakenteesta yksinkertaisempi ja ympäristöystävällisempi.

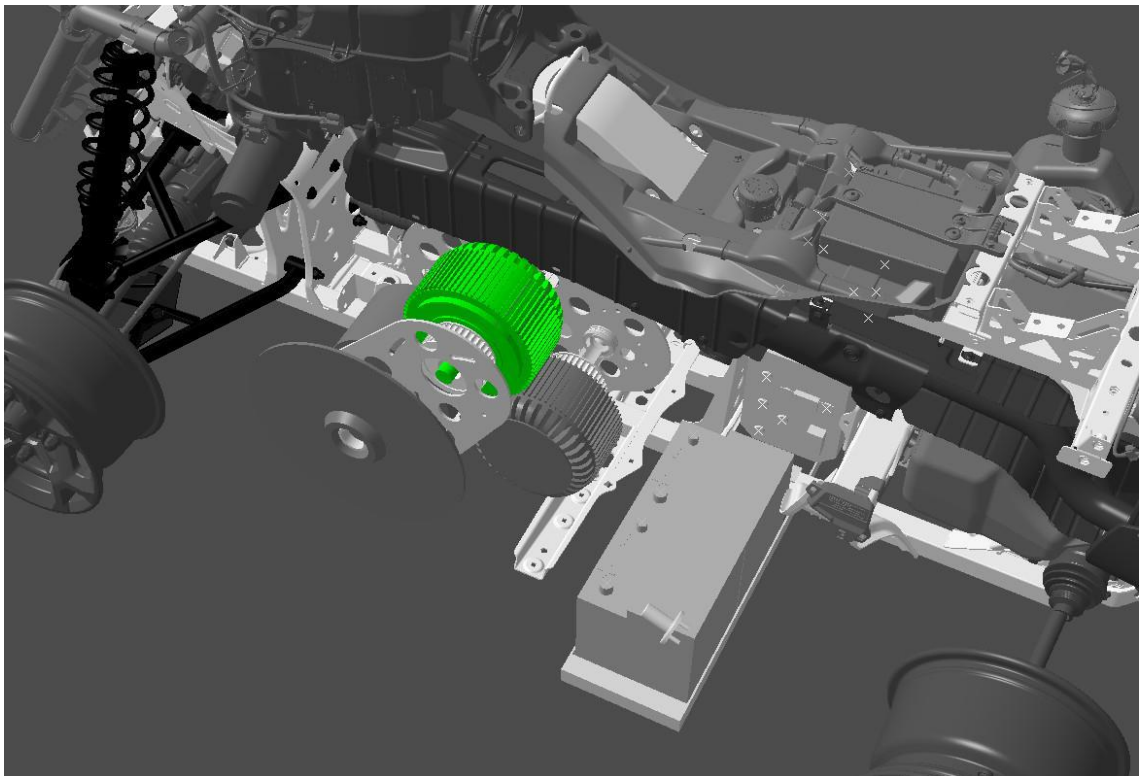
Neptunus-vaihteella ja säätömoottoreilla korvataan siis mönkijän alkuperäinen hihnavariaattori.

Kuvassa 4 nähdään prototyypin voimalinja. Moottorin kampiakseli on yhteydessä A-akseliin adapterin avulla ja säätöakselia eli S-akselia käyttää kuvaan vihreällä merkitty sähkömoottori hammashihnan välityksellä. Ulostulo akselilta B tapahtuu hihnavedolla mönkijän alkuperäisen vaihteiston akselille. Tällä akselilla on myös puhtaan sähköajon mahdollistava sähkömoottori.

Punaisella värillä kuvataan polttomoottorin voiman kulkua vaihteistolle ja sinisellä sen kulkua säätöakselin sähkömoottorille, joka toimii säätöakselia jarruttaessaan generaattorina.



Kuva 4. Prototyypin voimalinja [4].



Kuva 5. Ensimmäinen prototyyppi [4].

Komponenttien sijoitteluun ei vielä tässä prototyypissä kiinnitetty juurikaan huomiota, vaan tarkoituksena oli selvittää, kuinka hyvin vaihteisto toimisi hybridisovelluksessa, ja nimenomaan olemassa olevalla Neptunus-vaihteella. [4.]

### 2.3.2 Tulokset

Prototyyppi saatiin toimintakuntoiseksi kevään 2014 aikana ja sillä päästiin ajamaan testiajoa dynamometrissä.

Suurimpana ongelmana tässä prototyypissä oli S-akselin eli Neptunuksen kuoren suuri hitausmomentti. Tämä johti siihen, että vaadittaessa nopeaa pyörintänopeuden muutosta säätöakselilta, itse ajoneuvossa havaitaan selviä nopeuden muutoksia. Tämä tapahtuu esimerkiksi polttomoottorin käynnistyessä mönkijän liikkeessä puhtaasti sähköajon aikana, eli kun siirrytään hybridikäytölle.

Ajettaessa pelkästään sähkömoottorilla polttomoottori ei pyöri, ja tämä on korjattava säätöakselin S eli Neptunuksen kuoren pyörintänopeudella. Kuoreen varastoituu nopeasti paljon liike-energiaa. Polttomoottorin käynnistyessä säätöakselia on tarve nopeasti hidastaa. Käytetyillä sähkömoottoreilla ei kuitenkaan saatu aikaan riittävää hidastuvuutta, vaan polttomoottorin käynnistyessä ajoneuvon nopeudessa tapahtui epätoivottu hyppäys.

Toinen ongelma, joka tiedettiin alusta asti, oli komponenttien suuri koko ja niiden viemä tila. Variaattorin tilalle asennettu voimansiirto oli selvästi suurempi kuin alkuperäinen kokoonpano. Vasemmalle jalalle ei käytännössä ollut tilaa ja lisäksi voimansiirrosta oli paljaana pyöriviä akseleita ja hihnoja. [4.]

## 3 Voimansiirron uudelleensuunnittelu

Voimansiirron uudelleensuunnittelu aloitettiin ensimmäisen prototyypin tulosten pohjalta. Tämä tehtiin saman mönkijän rungolle.

### 3.1 Konsepti

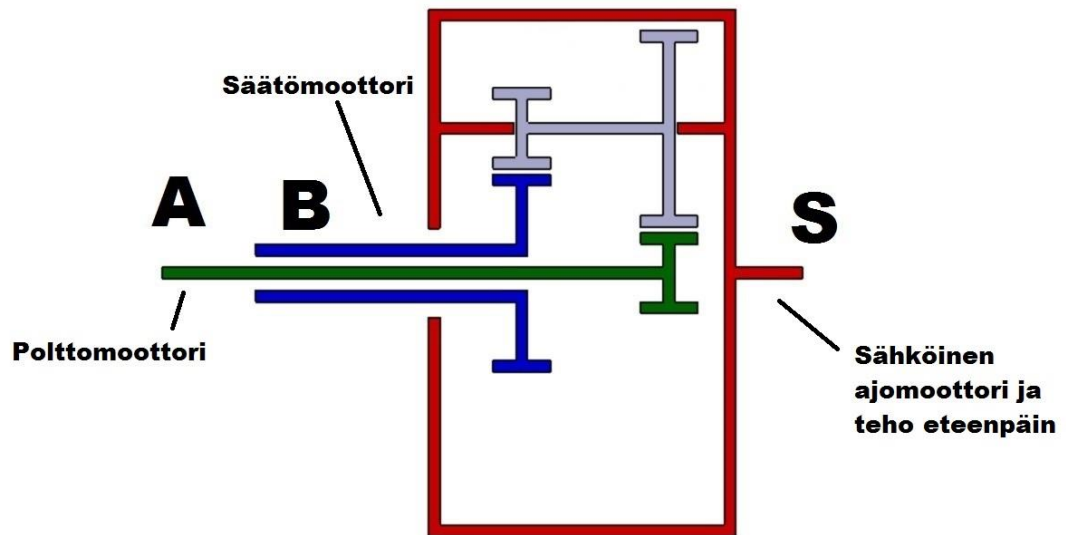
Suunnittelu aloitettiin pohtimalla, miten ei-toivotuista nopeuden muutoksista päästäisiin eroon. Mahdollisena ratkaisuna pöydällä oli muun muassa Neptunus-vaihteen sisäisten välityssuhteiden uudelleensuunnittelu ja uuden vaihteen valmistus. Tähän ei kuitenkaan haluttu ryhtyä.

Parhaimpana ja kaikin puolin edullisimpana vaihtoehtona päädyttiin ratkaisuun, jossa käytetään samaa vaihdetta, mutta vaihdetaan säätöakselin ja ulostuloakselin paikat voimansiirrossa. Polttomoottori pyörittää edelleen akselia A, mutta säätöakseliksi valittiin akseli B, ja akseli S on suoraan yhteydessä ajoneuvon muuhun voimansiirtoon. Tästä seuraa, että Neptunuksen kuoren hitausmomentti summaantuu suoraan veto-pyörästölle, eikä se aiheuta odottamattomia ongelmia ajoneuvon toiminnan aikana. Vaihdon vuoksi koko voimansiirron välityssuhteet muuttuvat.

Muutoin päädyttiin edellisen prototyypin kanssa samantapaiseen ratkaisuun. Ensimmäinen sähkömoottori on säätöakselilla, joka tällä kertaa on B-akseli, ja toinen sähkömoottori sijoitetaan S-akselille sähköajon toteuttamiseksi.

### 3.2 Vaihteen toiminta uudessa kokoonpanossa

Voimansiirron uudelleenjärjestelyn jälkeen akseleiden toiminnot näkyvät kuvassa 6. Sähkömoottoreiden valintaa ja ylipäättään rakenteen järkevyyttä varten pitää laskea akseleiden toteutuvat pyörintänopeudet käytön aikana. Polttomoottoria pyrittiin kuormittamaan järkevällä kierroslukualueella. Moottorin kierrosluvun ylärajaksi sovittiin 6000 kierrosta minuutissa.



Kuva 6. Neptunuksen akselit uudessa voimansiirrossa

Neptunukselle, joka oli valmistettu hydraulimönkijää varten, on olemassa akselien nopeuksien välillä yhteys [3, s. 25, kaava 16]:

$$3,24 \times n_B - 2,24 \times n_S - n_A = 0$$

$n_B$  akselin B pyörintänopeus

$n_S$  akselin S pyörintänopeus

$n_A$  akselin A pyörintänopeus

Momentin jakautuminen vaihteessa tapahtuu kaikkien akselien pyöriessä aina samalla välityssuhteella akselin nopeudesta riippumatta. Nämä välityssuhteet ovat seuraavat [3, s. 27, kaavat 23, 24 ja 25]:

$$i_{AB} = \frac{27^2}{15^2} = 3,24$$

välityssuhde A:lta B:lle



$$i_{AS} = 1 - i_{ab} = -2,24$$

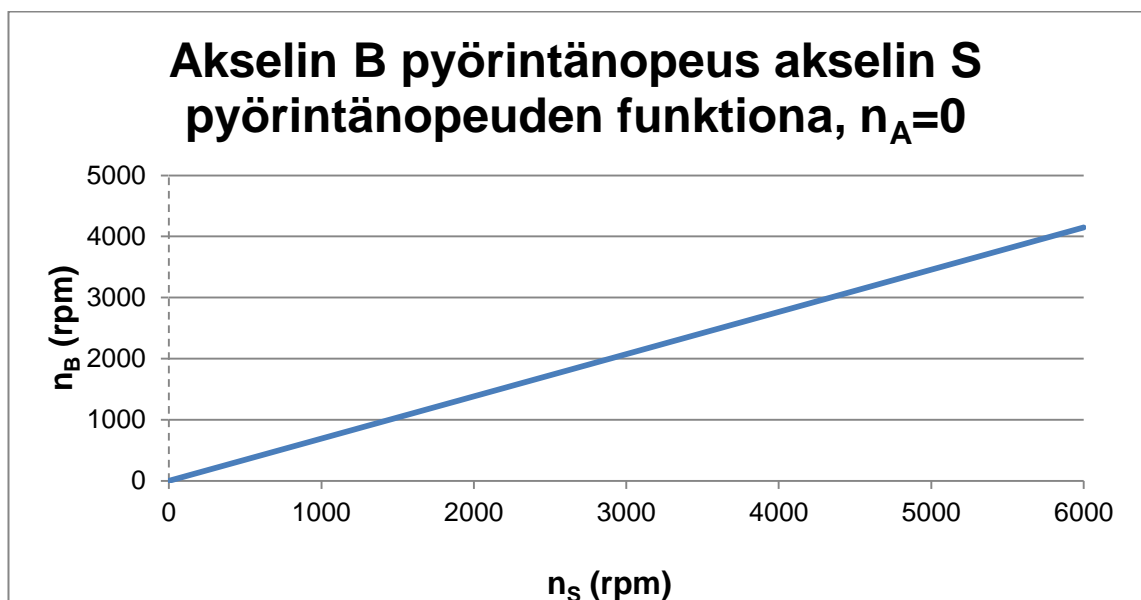
välityssuhde A:lta S:lle

$$i_{SB} = \frac{3,24}{-2,24} = -1,446$$

välityssuhde S:ltä B:lle.

### 3.2.1 Sähköajo

Kun mönkijää ajetaan puhtaasti sähköllä, pitää ottaa huomioon, että polttomoottori ei pyöri eli akselin A pyörintänopeus on nolla.



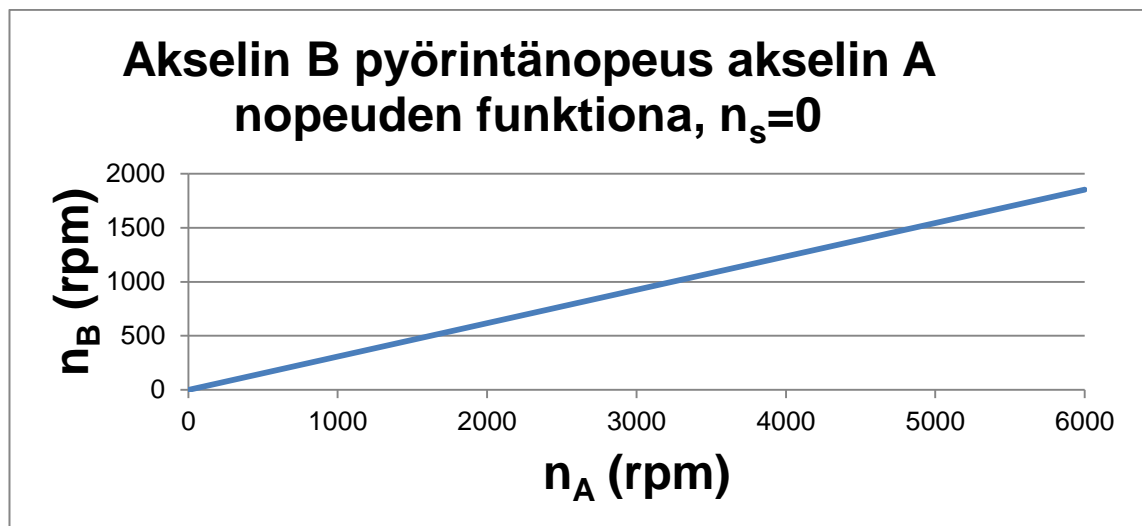
Kuva 7. Akseleiden pyörintänopeudet sähköajossa.

Kuvasta 7 nähdään, millä nopeudella säätöakselia eli Neptunuksen B-akselia täytyy pyörittää, jotta pysähtynyt polttomoottori voidaan kompensoida. Tässä pitää muistaa, että S-akselille eli vaihteen jälkeiselle akselille sijoitetaan varsinainen sähköinen ajomoottori.

### 3.2.2 Joutokäynti ja paikallaan lataus

Jos polttomoottori syystä tai toisesta halutaan käynnistää mönkijän ollessa paikallaan, Neptunuksen S-akseli pysyy liikkumatta. Tämä on seurausta siitä, että se on suoraan välitetty renkailla. Polttomoottorin pyörintänopeus täytyy kuitenkin kompensoida säätöakselilla.

Jos päädytään tilanteeseen, jossa polttomoottorilla joudutaan lataamaan akkuja, se onnistuu säätöakselin sähkömoottorin avulla. Sähkömoottoria voidaan luonnollisesti käyttää generaattorina, kunhan moottorin ohjaus on tehty sallimaan se tietyin reunaehdoin. Lataustilanteessa mönkijän nopeudeksi asetetaan myös nolla.



Kuva 8. Akseleiden nopeudet pysähdyksissä.

Kuvasta 8 nähdään säätöakselin pyörintänopeus polttomoottorin pyörintänopeuden funktiona, kun mönkijä on pysähdyksissä.

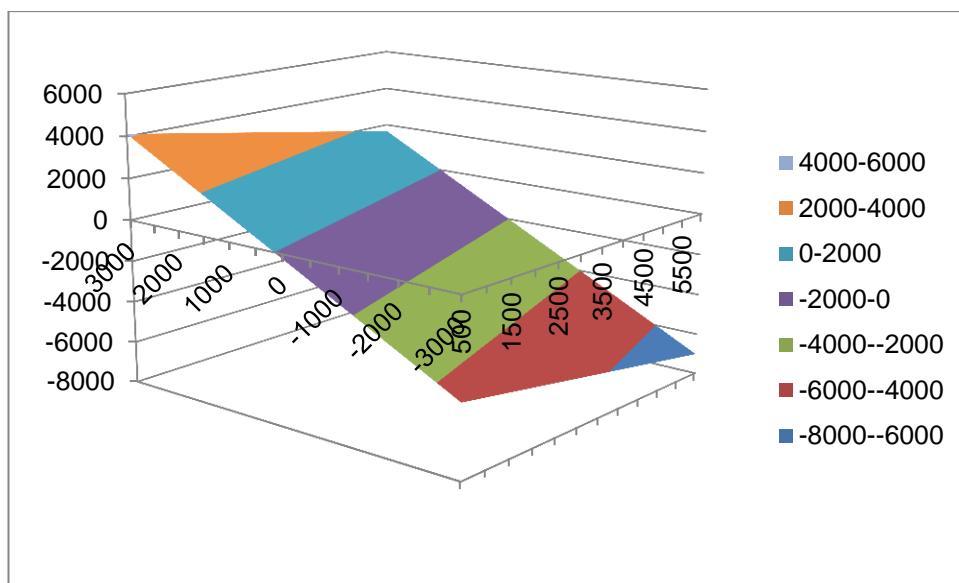
### 3.2.3 Hybridiajo

Kun kaikki akselit pyörivät, saadaan mielenkiintoinen tilanne. Vaihteen täysin portaaton luonne tulee esiin.

Hybridiajon aikana voidaan valita polttomoottorin pyörintänopeusalue ohjelmallisesti ja pitää sitä määräävänä tekijänä.

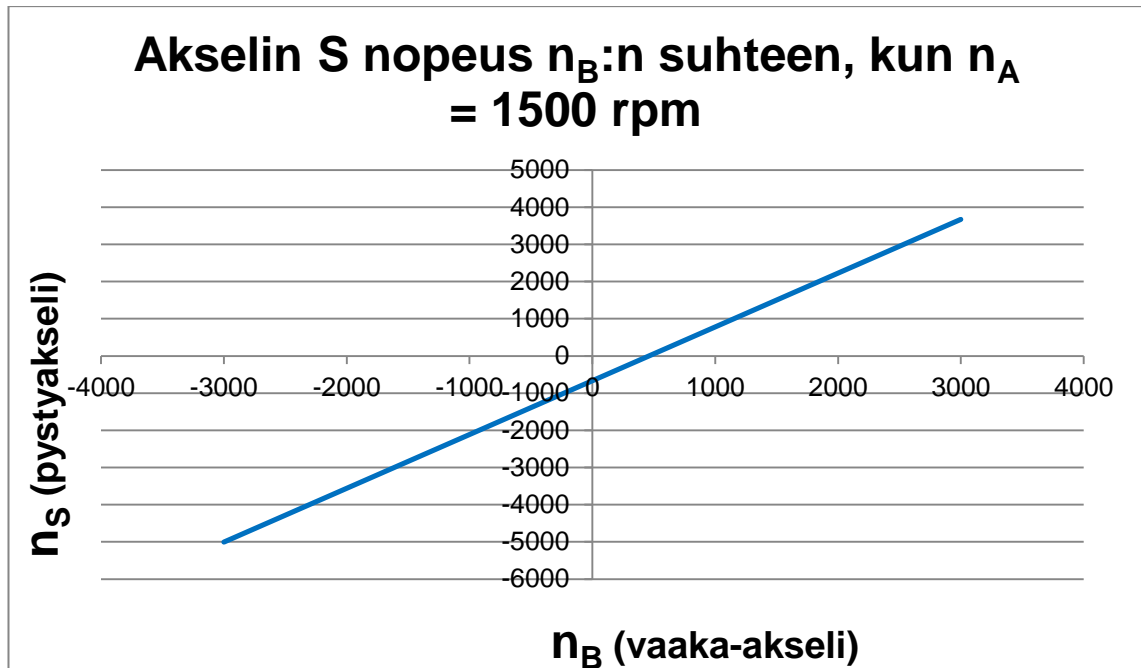
Eri moottoreiden kuormituksia säätämällä on teoriassa mahdollista, että akkujen kapasiteetin vajetessa ohjataan enemmän tehoa polttomoottorilta ja asetetaan S-akselin ajomoottori generaattorin asemaan, jolloin polttomoottorilla ladataan akustoa.

Kaaviossa 9 pinta on S-akselin nopeus ja pystyakselilla ovat sen arvot, kun annetaan B-akselille nopeudet negatiivisesta kolmestatuhannesta positiiviseen ja A-akselille eli polttomoottorille arvot nollasta kuuteentuhanteen kierrokseen minuutissa. B-akselin arvot ovat siis pidemmällä, vasemmanpuoleisella janalla.

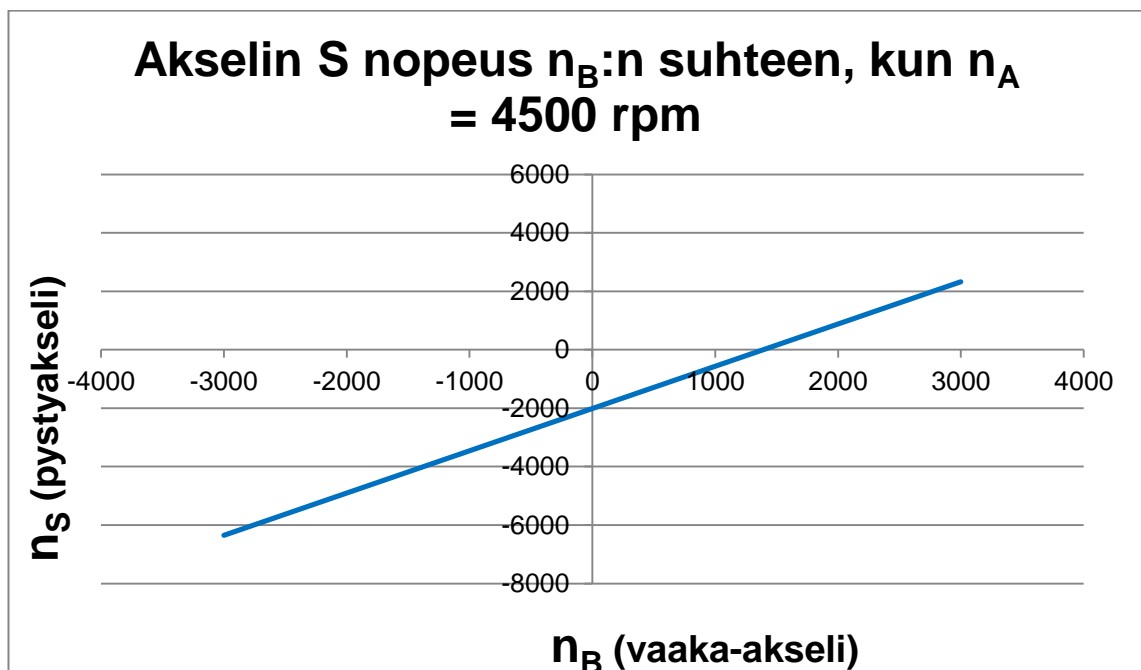


Kuva 9. S-akselin nopeus muiden akselien nopeuksien funktiona.

Selkeyden vuoksi seuraavassa vielä kuvaajat, kun määritetään polttomoottorin pyörintänopeudeksi 1500 ja 4500 kierrosta minuutissa.



Kuva 10. S-akselin nopeus B-akselin funktiona, kun A-akselin nopeus on 1500 rpm



Kuva 11. S-akselin nopeus B-akselin funktiona, kun A-akselin nopeus on 4500 rpm

Välityssuhteen kaavasta ja kaavioista huomataan, että positiivinen polttomoottorin nopeus ja negatiivinen säätöakselin nopeus johtavat kasvavaan negatiiviseen S-akselin nopeuteen. Tässä vaiheessa päädyttiin siihen, että mikäli on sijoittelun kannalta mahdollista, negatiiviseksi valittu S-akselin pyörintäsuunta on positiivinen ajoneuvon kulkusuunta.

#### 3.2.4 Mönkijän välityssuhteet

Mönkijässä on variaattorin jälkeen kaksi alennusvaihdetta: vaihteisto ja perävälitykset. Vaihteistosta voidaan valita iso alue, pieni alue, peruutusvaihde ja nelivedon kytkentä. Perävälitys sekä edessä että takana ovat luonnollisesti samat.

Kokonaisvälityssuhde vaihteiston sisääntuloakselilta perän jälkeiselle vetoakselille on pienellä alueella n. 7,74 ja isolla alueella n. 4,22.

#### 3.2.5 Johtopäätökset

Neptunuksen akseleiden uudelleenjärjestelyn jälkeen voidaan todeta seuraavaa:

- Kaikkien akseleiden pyörintänopeudet ovat järkeviä.
- Säätöakselin käytännön pyörintänopeusväli voidaan asettaa välille +3000 kierrosta minuutissa ja -3000 kierrosta minuutissa. Ohjelmallisesti tulee kuitenkin välttää kierroksia lähellä nollaa, sillä sähkömoottorin momentin tuotto on tällä alueella epämääräistä.
- S-akselin käytännön pyörintänopeus sijoittuu laskuissa välille +4000 kierrosta minuutissa ja -7000 kierrosta minuutissa. Kuten aiemmin todettiin, positiivinen polttomoottorin pyörintäsuunta ja negatiivinen säätömoottorin pyörintäsuunta kasvattavat S-akselin nopeutta negatiiviseen suuntaan. Järkevää on silloin valita tämä suunta ajoneuvon kulkusuuntaan nähden positiiviseksi.

- Edellisen prototyypin säätöakselin suuren hitausmomentin ongelma on saatu ratkaistua, sillä uudella rakenteella säätöakselilla on huomattavasti vähemmän hitautta. Tosin S-akselin hitausmomentti on vieläkin olemassa, mutta se näkyy osana voimansiirtoa eikä sillä ole enää vaihteen toiminnan kannalta juurikaan merkitystä.

## 4 Toteutus

Kun päästiin vaiheeseen, jossa voitiin todeta voimansiirron toimivan halutulla tavalla, alkoi mekaanisen toteutuksen suunnittelu.

### 4.1 Komponentit

Kun projektia ihan alussa lähdettiin tekemään, asetettiin yhdeksi tavoitteeksi mahdollisuus käyttää voimansiirtoa myös saman kokoluokan muissa sovelluksissa. Esimerkiksi moottorikelkkaan se voisi soveltua mainiosti, sillä Neptunuksen ulkokuori voitaisiin asettaa suoraan telaa pyörittäväksi.

Sähkömoottoreiden valinnasta ei ollut aiemmin juuri keskusteltu, mutta toiveena oli projektin sisällä säilyttää jännitetaso suhteellisen maltillisena ja akusto yksinkertaisena.

#### 4.1.1 Polttomoottori

Koska pöydällä oli mahdollisuus käyttää voimansiirtopakettia myös muualla kuin tässä mönkijässä, saimme suorituskykytiedot ja 3D-piirustukset 600-kuutioisesta 2-sylinterisestä rivimoottorista. Vaihtoehtoina oli siis käyttää joko tätä tai alkuperäistä 500-kuutoista Rotax V2 -moottoria.

Jos päädyttäisiin rivimoottorin käyttöön, paketista olisi mahdollista saada todella kompakti, sillä alkuperäisen moottorin kanssa joudutaan komponentteja sijoittelemaan hajalleen moottorin rinnalle.

#### 4.1.2 Sähkömoottorit

Ajomoottorina eli S-akselin moottorina haluttiin käyttää pohdinnan jälkeen Enstrojin Emrax-moottoria. Moottorista on saatavilla versiot eri jännitealueilla käytettäväksi ja Metropolian Formula Student -tiimi oli päätenyt aiemmin saman moottorin korkeajänniteversioihin.

Moottori on kestmagnetoitu AC-moottori, ja sillä on hyvät vääntöominaisuudet sopivalta kierroslukualueella. Sillä on erikoinen piirre, sillä sen roottori on ulkopuolella ja staattori sisäpuolella eli lyhyesti sanottuna sen ulkokuori pyörii. Se on ymmärrettävää, sillä moottorin pääasiallinen sovellus on sähkömoottoriavusteisen purjelentokoneen potkurin suoravetomoottori. Se saa ilmajäähdytetynä jäähdytysilmansa suoraan ilmavirrasta. Emraxista on tarjolla kolmea eri kokoluokkaa sekä ilma- että nestejäähdytetynä.



Kuva 12. Emrax purjelentokoneen moottorina [5].

Säätöakselin moottoriksi kaavailtiin kompaktia ja kevyttä sähkömoottoria, jonka roottori on sisäporattu (engl. ring motor). Tällä saataisiin erittäin kompakti rakenne, sillä ei tar-

vittaisi mekaanista välitystä erikseen pois B-akselilta, vaan sähkömoottori olisi saman-keskeinen akselin kanssa. Markkinoilta löytyy kuitenkin varsin huonosti sopivan kokoisia moottoreita, ja ne ovat hinnakkaita. Säättöakselilla päätettiin alustavasti käyttää myös Emraxia, jotta moottoreiden ohjaukset olisivat toisiaan vastaavat.

#### 4.1.3 Akusto

Jotta akuston teho ja energiatiheys saataisiin nykypäivän tasolle, tulisi akuston olla litiumpolymeerikennoista rakennettu. Silloin tarvittaisiin myös akustonhallintajärjestelmä, jolla valvotaan akuston tilaa kuormituksessa ja latauksen aikana, sekä tarkkaillaan akuston kuntoa. Tässä tapauksessa akustosta saataisiin turvallisesti sähkötehoa korkeallakin jännitteellä.

Akuston suunnitteluun ei kuitenkaan haluttu käyttää liiaksi aikaa, joten sen suhteen päädyttiin Braggen käyttämään ratkaisuun [4].

Yksi mielenkiintoinen mahdollisuus olisi tosin käyttää esimerkiksi akkukäyttöisten moottorisahojen akkuja. Niiden energiatiheys on jo varsin korkealla ja laadukkaissa akuissa on jokaisessa oma hallintayksikkö mukana.

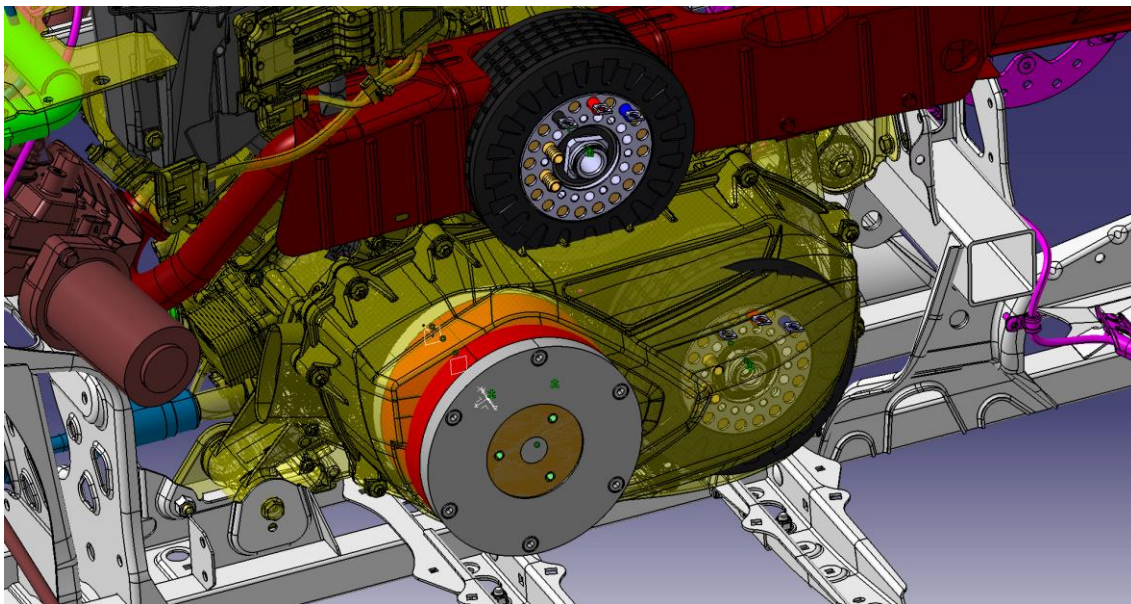
### 4.2 Ratkaisumallit

Ennen projektin jatkamista päädyttiin kolmeen erilaiseen ratkaisuun, joilla sitä voidaan viedä eteenpäin.

#### 4.2.1 Rotax ja vanha vaihteisto

Alkuperäisen moottorin kanssa vanhaa vaihteistoa hyödyntäen tehdään käytännössä sama asia kuin Bragge teki aiemmin ensimmäisessä prototypissään eli korvataan alkuperäinen hihnavariaattori Neptunuksella ja sähkömoottoreilla.





Kuva 13. Komponenttien sijoitus verrattuna variaattorin koteloon

Tässä ratkaisussa Neptunus sijoitetaan suoraan polttomoottorin viereen siten, että A-akseli kytketään polttomoottorin kampiakselille. B-akselilla on hihnapyörä, jota pyörittää Neptunuksen yläpuolelle sijoitettu sähkömoottori. Neptunuksen S-akselilta eli kuoren ulkopuolelta kytketään hammaspyöräpari toiselle sähkömoottorille, koska kuoren negatiivinen pyörintänopeus haluttiin ajoneuvon positiiviseksi nopeudeksi. Periaatteessa Neptunuksen ulkokuoreen voidaan koneistaa välikappale, jossa on hammastus.

Tämä ratkaisu on mahdollinen vain, koska Emraxissa on paikallaan olevan staattorin eli moottorin sisäosan läpi poraus. Tästä saadaan läpi voimansiirtoakseli, joka kytketään alkuperäisen vaihteiston akselille.

Koska alkuperäinen vaihteisto säilytetään, kaikki komponentit joudutaan sijoittamaan edellisen prototyypin tapaan mönkijän vasemmalle puolelle. Tästä aiheutuu vasemman jalkatilan pieneneminen huomattavasti. Edelleen, jotta rakenne olisi millään tavalla järkevän kokoinen, joudutaan mm. pakoputkistoa muokkaamaan tilan saamiseksi säätömoottorille. Tämä ei tosin ollut missään vaiheessa ongelma, sillä tarve alkuperäisten rakenteiden muutoksille oli tiedossa.

Sähkömoottoreiden ja painavan Neptunuksen tuentaan pitää kiinnittää erityisesti huomiota.

Vanhalla vaihteistolla on hidas ja nopea alue. Välityssuhteet saadaan kaavasta:

$$i = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

$i$  välityssuhde

$Z_1$  käytävän hammaspyörän hammasluku

$Z_2$  käytettävän hammaspyörän hammasluku

$n_1$  käytävän pyörän kierrosnopeus

$n_2$  käytettävän pyörän kierrosnopeus

Tästä saadaan myös

$$n_1 = i * n_2$$

Pyörivässä liikkeessä on kaava

$$V = r * \omega$$

$V$  pisteen hetkellinen ratanopeus

$r$  pisteen säde ympyrän keskipisteestä

$\omega$  hetkellinen kulmanopeus (rad/s)

ja

$$\omega = 2 * \pi * n$$

Näistä yhdistämällä saadaan

$$V = 2 * \pi * r * n$$

Ja edelleen

$$n = \frac{V}{2 * \pi * r}$$

Jos oletetaan, että renkaan dynaaminen säde ei eroa oleellisesti sen staattisesta säteestä, saadaan S-akselin pyörintänopeudeksi tavoitellulla 80 kilometrin tuntinopeudella eli n. 22,22 metrin sekuntivauhdilla 26":n renkailla:

Isolla alueella saadaan

$$\begin{aligned} n_{S\ iso} &= i_{ISO} * \frac{V}{2 * \pi * r} = 4,22 * \frac{22,22\ m/s}{2 * \pi * 0,33\ m} = 45,22\ 1/s \\ &= 45,25 * 60\ 1/min \\ &= 2713\ 1/min \end{aligned}$$

Pienellä alueella saadaan

$$\begin{aligned} n_{S\ pieni} &= i_{PIENI} * \frac{V}{2 * \pi * r} = 7,74 * \frac{22,22\ m/s}{2 * \pi * 0,33\ m} = 82,95\ 1/s \\ &= 82,95 * 60\ 1/min \\ &= 4977\ 1/min \end{aligned}$$

Pitää muistaa, että laskuissa muutetaan kulmanopeus kierrosnopeudeksi.

Edut:

- Helpoin tehdä
- Nelivedon kytkin ja pysäköintijarru pysyvät samanlaisina. Myös mekaaninen peruutusvaihte säilyy, mikäli sitä päätetään käyttää.

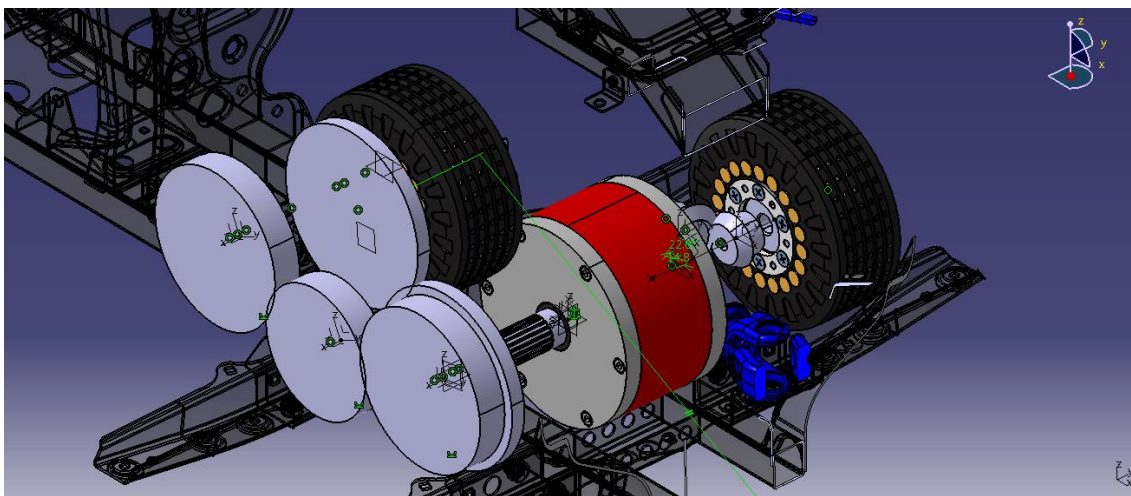
Haitat:

- Komponentit vievät paljon tilaa mönkijän vasemmalta puolelta.
- Vaihteistossa on ennalta määrätty välityssuhteet.
- Pakoputkea täytyy muokata.

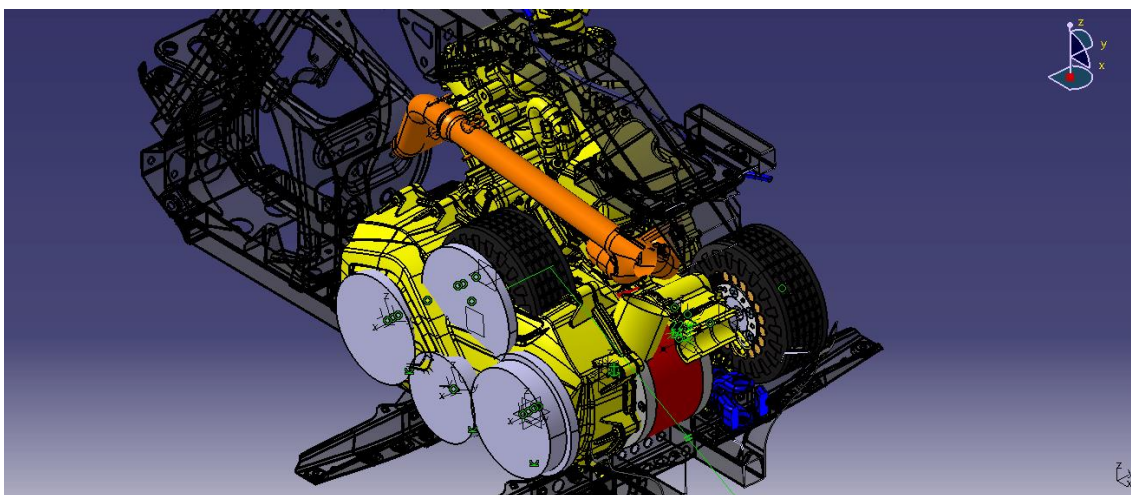
#### 4.2.2 Rotax ilman vanhaa vaihteistoa

Jos polttomoottorin vanha vaihteisto saadaan korvattua omalla kulmavaihteella, komponenttien sijoittelu helpottuu.

Neptunus saadaan sijoitettua moottorin ja rungon väliin moottorin takapuolelle ja sähköinen ajomoottori rungon oikealle puolelle. Säättävä sähkömoottori jää vasemmalle puolelle. Tavoitteena oli käyttää välityksissä hammaspyöriä niiden helpon saatavuuden vuoksi.



Kuva 14. Pelkät hybridin komponentit rungossa.



Kuva 15. Kokonaisuus alkuperäisen moottorin ja variaattorin kotelon kanssa.

Komponenttien sijoittelun ohella saadaan myös se etu, että kulmavaihteelle voidaan määrittää oma välityssuhde.

Edut:

- Edullinen komponenttien sijoittelun kannalta.
- Vapaus valita kulmavaihteen välityssuhde.
- Enemmän jalkatilaa.

Haitat:

- Jarrupoljin pitää ajomoottorin vuoksi sijoittaa uudelleen.
- Kulmavaihte pitää tehdä kokonaan itse.
- Vaihteiston poistuessa poistuu myös nelivedon kytkin ja pysäköintijarru.

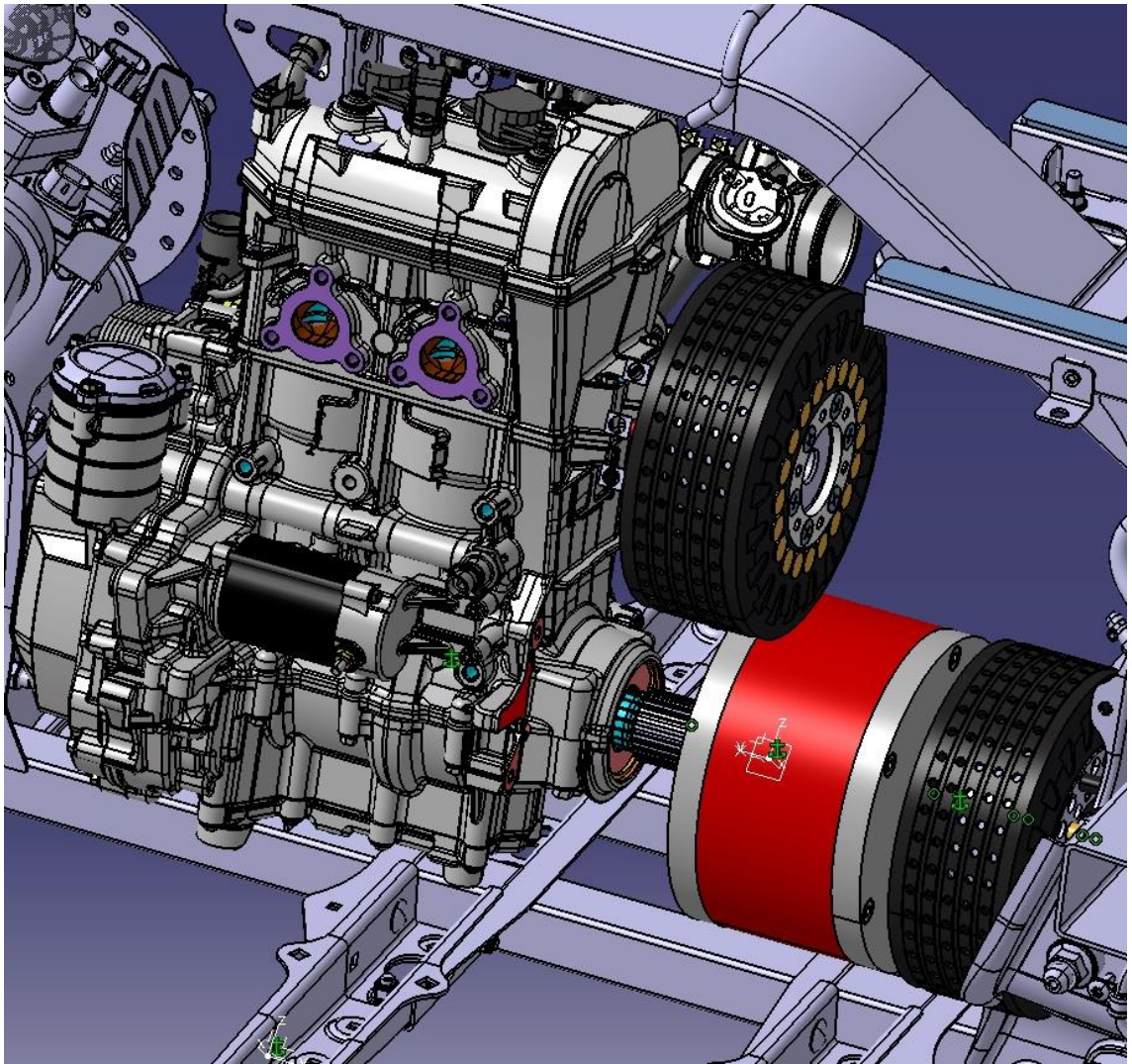
#### 4.2.3 ACE602 ja suora voimansiirto

ACE602 on suora 2-sylinterinen nelitahtimoottori. Tämän moottorin kanssa oli mahdollista saada aikaan mitoiltaan suhteellisen kompakti ja yksinkertainen voimapaketti.

Kuten edellä mainittiin, ajatuksena oli sovittaa voimalinja olemassa olevan mönkijän rungolle poistamalla alkuperäinen moottori.

Työ aloitettiin mallintamalla saatu moottori hybridikomponenttien kanssa mönkijän runkoon.

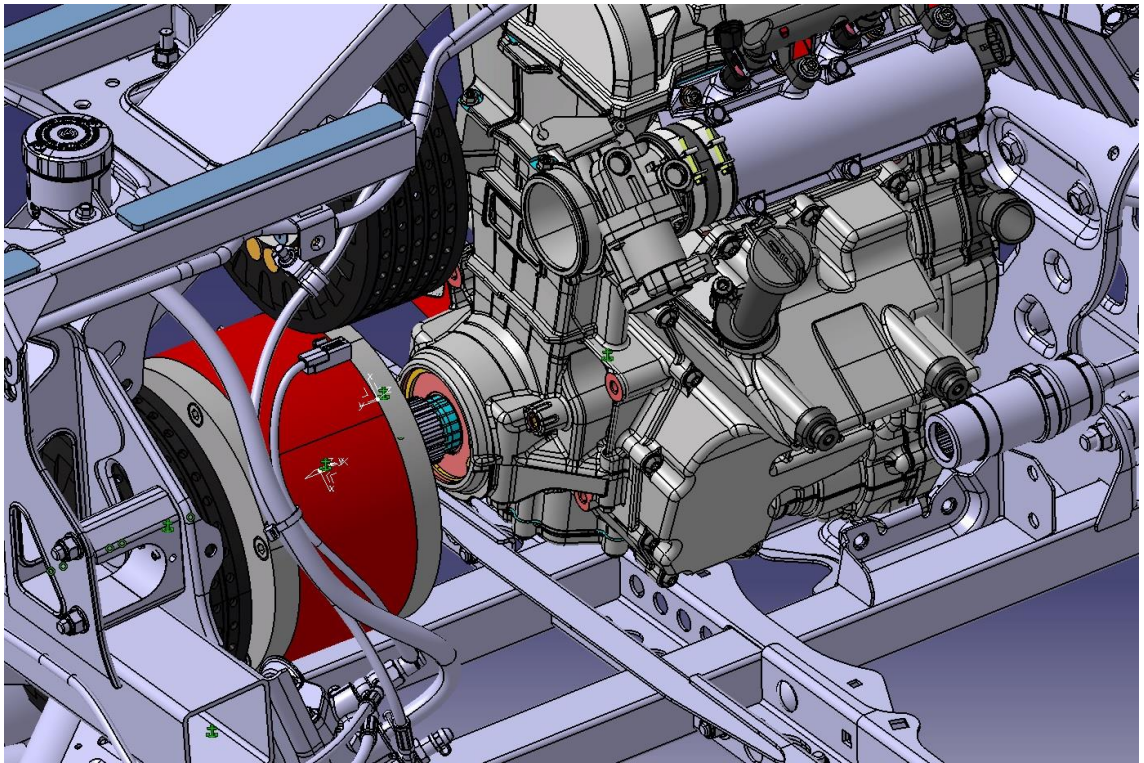




Kuva 16. ACE602 mönkijän rungossa

Kuten edellä mainittiin, ajatuksena oli sovittaa voimalinja olemassa olevan mönkijän rungolle poistamalla alkuperäinen moottori. Neptunus sijoitetaan suoraan moottorin taakse, säätömoottori Neptunuksen yläpuolella olevaan tilaan ja sähköinen ajomoottori Neptunuksen taakse. Koska voimansiirtoakselit perävälityksille säilyvät rungon oikealla puolella, Neptunuksen kuorelta voima siirtyy lieriöhammastuksella.

Pitää muistaa, että etummainen perävälityksen akseli kulkee alkuperäisessä moottoris- sa öljypohjan läpi. Uuden moottorin kanssa sen sijainti muodostuu ongelmaksi, sillä moottoria pitää tuoda huomattavan paljon vasemmalle rungossa. Tämän vuoksi sitä pitää myös kallistaa rungossa nojaamaan oikealle.



Kuva 17. Voimansiirtoakseli moottorin vieressä.

Korkeussuunnassa on hyvin vähän pelivaraa, ja pituussuunta muodostuu myös ongelmaksi. Vaikka moottori tuodaan mahdollisimman eteen, kunnollisen kiinnityksen rakentaminen taaemmalle sähkömoottorille on tilan puolesta ongelma. Samoin jännitteelliset moottorin navat tulevat lähelle runkoa.

Edut:

- Valmistuessaan helpoin siirtää muille alustoille.
- Selkeä perusrakenne, yksinkertainen komponenttien sijoittelu.
- Ei välttämättä tarvetta erilliselle kulmavaihteelle.

Haitat:

- Tilan ahtaus kyseisessä mönkijässä.
- Moottori vaatii täysin uudet kiinnikkeet.
- Pysäköintijarru ja nelivedon kytkin puuttuvat.

### 4.3 Ratkaisu

Eri mallien perusteella tultiin työn tilaajan kanssa siihen tulokseen, että käytetään vanhaa moottoria, mutta jätetään alkuperäinen vaihteisto pois. Tällä tavalla saadaan voimansiirrosta tähän prototyyppiin parhaiten sopiva.

## 5 Yhteenveto

Edellisen prototyypin pohjalta on saatu kehitettyä paremmin toimiva vaihteisto Neptunus-vaihdetta käyttäen. Koska Neptunuksen sisäinen kytkentä on pysynyt samana, tästä on helppo jatkaa eteenpäin komponenttisuunnitteluun ja valmistukseen.

Neptunus-vaihteella on mahdollista tehdä vaihteisto, jonka välityssuhdealue ulottuu äärettömästä aina ylivaihteelle saakka, poistaen mekaanisen kytkimen tarpeen. Myös peruutusvaihte on mahdollinen, joskin sitä varten tullaan käyttämään sähkömoottoria.

Yhtenä suurimpana huolena projektin aikana on ollut säätöakselin sähkömoottorin vääntömomentin riittävyys B-akselilla Neptunuksen käännön jälkeen. Emrax on suoritusarvojensa perusteella sopiva tähän tehtävään jo suoravetoisena, ja koska B-akselin nopeusalue on suhteellisen pieni, voidaan sähkömoottori tarvittaessa välittää eri välityssuhteella akselille.

Syksyn 2015 aikana projektissa on edetty valitulla ratkaisumallilla. Aiemmin mallinnetuista tilamalleista on piirretty tarkempi kokoonpano ja komponenteille on suunniteltu kiinnitykset.

Kaiken kaikkiaan Neptunuksella toteutettu vaihteisto on erittäin mielenkiintoinen rakenteeltaan ja toiminnaltaan. Siitä on mahdollista saada erittäin kevyt, välityssuhdealue on huomattavasti laajempi kuin on tähän asti totuttu CVT-vaihteistoissa, ja se mahdollistaa kalliiden komponenttien poistamisen voimalinjasta. Hyvällä ohjauksella on mahdollista saada täysin saumaton yhteistyö polttomoottorin ja sähkömoottorien kesken, luoden automaattivaihteiston käyttömukavuuden säästämällä huomattavasti polttoainetta.



## Lähteet

- 1 Karhima, Matti (2011) Autotekniikka 6. Voimansiirto. Helsinki: Otava.
- 2 Cronin, Mike (2012) An Introduction to Hydro-mechanical Transmissions.  
[http://www.nfpa.com/events/pdf/2012\\_eehpc/ppt/12\\_eehpc%2028%20nov.pdf](http://www.nfpa.com/events/pdf/2012_eehpc/ppt/12_eehpc%2028%20nov.pdf).  
Luettu 4.10.2015
- 3 Salminen, Rauli (2007) Diplomityö, Portaattoman voimansiirtojärjestelmän kehittäminen
- 4 Bragge, Mikael (2015) Insinööritö, Ajoneuvon sähköhybridimuunnoksen mitoitus ja optimointi
- 5 Electric Apis. 2015. Verkkosivusto. <http://www.enstroj.si/Glider-products/electric-apis.html>. Luettu 10.11.2015

